# 5 АКТИВНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Диэлектрики, электрическими и оптическими свойствами которых можно управлять с помощью электрических, магнитных, световых, тепловых и механических воздействий, называют активными.

В отличие от пассивных диэлектриков, от которых требуется стабильность свойств, требования к активному материалу совершенно противоположные: чем сильнее изменяются его свойства при внешних воздействиях, тем лучше активный элемент может выполнять функции управления энергией или преобразования информации.

Активные диэлектрики позволяют осуществить генерацию, усиление, модуляцию электрических и оптических сигналов, а также запоминание и преобразование информации. Следует отметить, что резкой границы между активными и пассивными диэлектриками не существует. Иногда один и тот же материал в различных условиях его эксплуатации может выполнять либо пассивные функции изолятора или конденсатора, либо активные функции управляющего или преобразующего элемента.

К числу активных диэлектриков относят: сегнето-, пьезо- и пироэлектрики; электреты; материалы лазерной электроники; жидкие кристаллы; электро-, магнито- и акустооптические материалы; диэлектрические кристаллы с нелинейными оптическими свойствами и другие материалы. Свойствами активных диэлектриков могут обладать не только твёрдые, но также жидкие и даже газообразные вещества (например, активная среда газовых лазеров). По химическому составу это могут быть органические и неорганические материалы. По строению и свойствам активные диэлектрики можно подразделить на кристаллические и аморфные, полярные и неполярные. Из всего многообразия активных диэлектриков в настоящем разделе рассмотрены лишь те, которые нашли широкое практическое применение.

## 5.1 Сегнетоэлектрики

Сегнетоэлектриками называют вещества, обладающие спонтанной (самопроизвольной) поляризацией. Это значит, что отдельные участки их структуры имеют собственные электрические моменты, вызванные смещением ионов или полярных групп атомов. При этом моменты соседних участков взаимно ориентируются в одном направлении в пределах макроскопической области, называемой **доменом**. Направления электрических моментов у разных доменов различны, поэтому суммарная поляризованность образца в целом может быть равна нулю. Внешнее электрическое поле изменяет направления электрических моментов доменов, что создаёт эффект очень сильной поляризации. Этим объясняются свойственные сегнетоэлектрикам сверхвысокие значения диэлектрической проницаемости (до сотен тысяч). Следствием доменного строения сегнетоэлектриков является нелинейная зависимость их электрической индукции от напряжённости электрического поля, а также петля электрического гистерезиса на кулонвольтной характеристике.

Спонтанная (самопроизвольная) поляризация достаточно широко распространена. В настоящее время известно несколько сотен химических соединений, в том числе и твёрдых растворов, обладающих свойствами сегнетоэлектриков. Температура перехода в спонтанно поляризованное состояние при остывании (точка Кюри) у различных сегнетоэлектриков составляет от нескольких кельвинов (например, у ниобата свинца Pb2Nb2O7 TК = 15 К) до полутора тысяч кельвинов (например, у ниобата лития LiNbO3 TК= 1483 К), а спонтанная поляризованность находится в пределах от 10–5 до 3 Кл/м2).

Вещества, электрические моменты соседних участков которых направлены встречно (антипараллельно), называют *антисегнетоэлектриками*. В их кристаллах электрические моменты соседних элементарных ячеек оказываются уравновешеными, следовательно, спонтанная поляризованность каждого домена равна нулю. Однако при нагреве выше температуры Кюри этот равновесие нарушается и антисегнетоэлектрики могут обладать высокой диэлектрической проницаемостью. Примерами антисегнетоэлектриков являются цирконат свинца PbZrО3, ниобат натрия NaNbO3 , дигидрофосфат аммония NH4H2PO4 и др.

Структура сегнетоэлектрических кристаллов разнообразна. По типу химической связи и строению все сегнетоэлектрики подразделяют на ионные и дипольные.

У ионных сегнетоэлектриков характерным структурным элементом кристаллической решётки является кислородный октаэдр, внутри которого компактный атом титана или иного элемента может занимать несколько устойчивых положений. К ионным сегнетоэлектрикам относятся титанат бария ВаTiO3, титанат свинца РbТiO3, ниобат калия KNbO3, ниобат лития LiNbO3, танталат лития LiТаО3. йодат калия КIO3, барий-натриевый ниобат Ba2NaNb5O15 или сокращенно – «банан» и др.

У кристаллов дипольных сегнетоэлектриков имеются готовые полярные группы атомов, способные занимать различные положения равновесия. К дипольным сегнетоэлектрикам относятся сегнетова соль NaKC4H4O6**·**4H2O, триглицинсульфат (NH2CH2COOH)3**·**H2SO4, дигидрофосфат калия КН2РO4, нитрит натрия NaNO2 и др. Именно в кристаллах сегнетовой соли впервые были обнаружены особенности поведения диэлектриков, обусловленные спонтанной поляризацией. Отсюда произошло название всей группы материалов со специфическими свойствами – сегнетоэлектрики.

Ионные и дипольные сегнетоэлектрики существенно различаются по физическим свойствам и особенностям применения.

## 5.2 Применение сегнетоэлектриков

В техническом применении сегнетоэлектриков наметилось несколько направлений, важнейшими из которых следует считать:

1) изготовление малогабаритных низкочастотных конденсаторов с большой удельной ёмкостью;

2) использование нелинейности поляризации для диэлектрических усилителей, модуляторов и других управляемых устройств;

3) использование сегнетоэлементов в счётно-вычислительной технике в качестве ячеек памяти;

4) использование кристаллов сегнето- и антисегнетоэлектриков для модуляции и преобразования лазерного излучения;

5) изготовление пьезо- и пироэлектрических преобразователей.

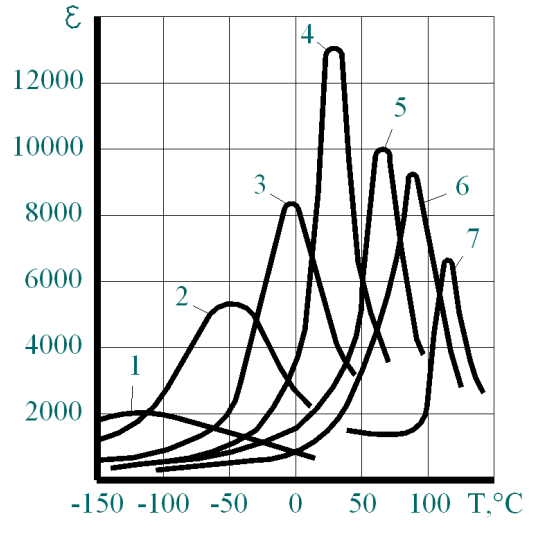
*Конденсаторная сегнетокерамика,* (рисунок 5.1) как и любой диэлектрик, для производства обычных конденсаторов должна иметь большую величину диэлектрической проницаемости с малой зависимостью от температуры, незначительные потери, небольшую зависимость ε и tgδ от напряжённости электрического поля (малую нелинейность), высокие значения удельного сопротивления и электрической прочности. Вблизи точки Кюри диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика максимальна, но нестабильна. Одним из важнейших методов получения оптимальных свойств в заданном температурном интервале является использование твёрдых растворов и смесей различных кристаллов. Изменением концентрации компонентов в твёрдом растворе можно регулировать значения диэлектрической проницаемости, смещать температуру Кюри (рисунок 5.1), изменять нелинейность поляризации и т. д.

Рисунок 5.1 – Графики зависимости

ε твёрдых растворов ВаТiO3+ВаZr03 от температуры при *f=*1 кГц:

1 – 60 % ВаТiO3; 2 – 70 %; 3 – 75 %;

4 – 80 %; 5 – 85 %; 6 – 90 %; 7 – 100 %



↑

T→

ºС 150

В твёрдых растворах, по сравнению с простыми веществами, можно получить более сглаженные температурные зависимости ε, что имеет важное значение для производства конденсаторов. В большинстве случаев конденсаторные сегнетокерамические материалы содержат несколько кристаллических фаз. При «размытом» фазовом переходе нелинейные свойства ди­электриков выражены сравнительно слабо. Графики зависимости диэлектрической проницаемости ε от температуры для некоторых сегнетокерамических материалов, применяемых при изготовлении малогабаритных конденсаторов различных типов, приведены на рисунке 5.2.

↑

Материал Т-900 (ε ≈ 900) представляет собой твёрдый раствор титанатов стронция SrTiO3 и висмута Bi4TiO12. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры выражена слабо, т.к. точка Кюри *t*k= – 140 °С расположена в области минусовых температур.

100

8000

6000

–100

4000

2000

50

0

–50

ε

Т→ºC

CM–1

T–8000

T–900

Рисунок 5.2 – Зависимость ε

конденсаторной сегнетокерамики от температуры

Материал СМ-1 (ε около 3000) на основе титаната бария с добавкой оксидов циркония и висмута, обладает сглаженной зависимостью диэлектрической проницаемости от температуры. Из него изготавливают низковольтные малогабаритные конденсаторы.

Материал Т-8000 (ε около 8000) для изготовления конденсаторов, в том числе и высоковольтных, работающих в нешироком интервале температур. Представляет собой твёрдый раствор ВаTiO3+BaZrO3. Отличается высоким значением диэлектрической проницаемости при комнатной температуре (вблизи точки Кюри).

*Материалы для варикондов.* Вариконды предназначены для управления параметрами электрических цепей за счёт изменения их ёмкости при воздействии нескольких напряжений, приложенных одновременно и различающихся по значению и частоте.

В простейшем случае им приходится работать при одновременном воздействии постоянного и переменного (синусоидального) электрических полей, причём *Е* >> *E*~.

Одна из основных характеристик варикондов – коэффициент нелинейности *К,* определяемый как отношение максимального значения диэлектрической проницаемости при некоторой, характерной для данного материала напряжённости электрического поля к начальному значению диэлектрической проницаемости. Численное значение коэффициента нелинейности для различных марок варикондов может быть от 4 до 50.

Нелинейные конденсаторы, обычно в тонкоплёночном исполнении, являются основой разнообразных радиотехнических устройств – параметрических усилителей, низкочастотных усилителей мощности, фазовращателей, умножителей частоты, модуляторов, стабилизаторов напряжения, управляемых фильтров и других устройств. Основной кристаллической фазой в таких материалах являются твёрдые растворы Ва(Тi+Sn)О3 или Pb(Ti+Zr+Sn)O3.

*Сегнетоэлектрики с ППГ.* Благодаря диэлектрическому гистерезису сегнетоэлектрики можно применять для запоминания информации. Здесь необходим материал с возможно более прямоугольной петлёй гистерезиса (ППГ), что характерно, например, для монокристаллов триглицинсульфата – ТГС – (NH2CH2COOH)3·H2SO4.

В отсутствие внешнего поля сегнетоэлектрик с ППГ имеет два устойчивых состояния, соответствующих различным направлениям остаточной электрической индукции. Одно из этих состояний в запоминающей ячейке означает хранение единицы, а другое – хранение нуля. Подавая внешнее напряжение различной полярности, сегнетоэлектрик можно переводить из одного состояния в другое. На этом основаны запись, считывание и стирание информации. Считывание информации можно осуществить без её разрушения, например, оптическим методом или измерением сопротивления тонкой полупроводниковой плёнки, нанесенной на поверхности сегнетоэлектрика. Время переключения ячейки из сегнетоэлектрического монокристалла зависит от его размера и при толщине в несколько десятых долей миллиметра составляет несколько микросекунд.

В сегнетокерамике процесс переполяризации в отдельных зёрнах происходит независимо, и время прорастания доменов определяется размерами зёрен, которые можно уменьшить до нескольких микрометров. В этом случае быстродействие выше, чем в монокристаллах, хотя прямоугольность петли гистерезиса ухудшается.

## 5.3 Электрооптические кристаллы

Кристаллы ряда сегнето- и антисегнетоэлектриков обладают ярко выраженным электрооптическим эффектом, под которым понимают изменение показателя преломления среды, вызванное внешним статическим электрическим полем. Если изменение показателя преломления пропорционально первой степени напряжённости, то электрооптический эффект называют линейным (или эффектом Поккельса). Если же это изменение пропорционально квадрату напряжённости поля, то электрооптический эффект называют квадратичным (или эффектом Керра).

Электрооптические свойства сегнетоэлектрических кристаллов используются для модуляции лазерного излучения. Разнообразные конструкции электрооптических модуляторов света созданы на базе кристаллов ниобата лития LiNbO3, дигидрофосфата калия КН2Р04 и его дейтерированного аналога KD2PО4 (дидейтеро-фосфат калия). Весьма перспективно применение в качестве электрооптического материала прозрачной сегнетокерамики системы ЦТСЛ – твёрдые растворы цирконата-титаната свинца с оксидом лантана.

Электрооптический эффект усиливается с приближением температуры сегнетоэлектрика к точке Кюри. Здесь возможна эффективная модуляция света небольшими напряжениями.

*Материалы нелинейной оптики.* При воздействии мощных световых пучков, создаваемых с помощью лазеров, во многих сегнето- и антисегнетоэлектриках проявляются нелинейные оптические эффекты, в основе которых лежит зависимость показателя преломления от напряжённости поля самой световой волны. Нелинейность оптических свойств сегнетоэлектрических кристаллов позволяет осуществить генерацию гармоник лазерного излучения, смешение и преобразование частот оптических сигналов. Большой практический интерес представляет преобразование инфракрасного излучения лазеров (обычно с λ = 1,06 мкм) в видимый свет. Высокую эффективность такого преобразования обеспечивают кристаллы КH2РО4 (дигидрофосфат калия), LiNbO3 (ниобат лития), LiIO3 (йодат лития), Ba2NaNb5O15 (барий-натриевый ниобат, «банан») и др.

## 5.4 Пьезоэлектрики

К пьезоэлектрикам относят диэлектрики, которые обладают сильно выраженными пьезоэлектрическими эффектами. *Прямым*пьезоэлектрическим эффектом называют явление поляризации диэлектрика под действием механических напряжений. Это изменение может быть продольным и поперечным; возникающий на каждой из поверхностей диэлектрика электрический заряд строго пропорционален механическому усилию. При *обратном*пьезоэлектрическом эффектепроисходит изменение размеров диэлектрика под действием электрического поля. Пьезоэлектричество было открыто братьями Кюри в 1880 г.

Пьезоэффекты наблюдаются лишь в веществах с гетерополярной химической связью, т. е. пьезоэлектриками могут быть либо ионные, либо сильнополярные диэлектрики. Вторым необходимым условием существования пьезоэффекта является отсутствие центра симметрии в структуре диэлектрика. В противном случае деформация вызывает симметричное смещение положительных и отрицательных зарядов, и электрический момент не возникает. Пьезоэлектриками могут быть лишь вещества с высоким удельным сопротивлением. В достаточно проводящих средах пьезоэлектрическая поляризация быстро компенсируется свободными носителями заряда. Поскольку любой диэлектрик обладает некоторым током утечки, все применения пьезоэффекта связаны с переменными быстропротекающими процессами.

Известно более тысячи веществ, обладающих пьезоэлектрическими свойствами, в том числе все сегнетоэлектрики, однако практически применяют ограниченный круг материалов. Важнейшим пьезоэлектриком является монокристаллический кварц, крупные прозрачные кристаллы которого называют «горный хрусталь».

Плоскопараллельная полированная кварцевая пластинка с электродами и держателем представляет собой пьезоэлектрический резонатор, т. е. является колебательным контуром. Резонансная частота колебаний зависит от толщины пластины и направления кристаллографического среза. Преимуществами кварцевых резонаторов являются малый tgδ и высокая механическая добротность (т. е. очень малые механические потери). В лучших кристаллах кварца механическая добротность может составлять 106–107. Это обеспечивает высокую частотную избирательность кварцевых резонаторов. Если в таком резонаторе возбудить колебания на резонансной частоте, то их затухание будет происходить в течение длительного времени. Кварцевый пьезоэлемент, вставленный в схему электрического генератора, навязывает ему собственную резонансную частоту.

Благодаря высокой добротности кварцевые резонаторы используются в качестве фильтров с высокой избирательной способностью, а также для стабилизации и эталонирования частоты генераторов (например, в радиолокационных станциях, вэлектронных часах и т. п.). Ввиду ограниченных запасов природного кварца основные потребности пьезотехники удовлетворяют искусственно выращиваемыми кристаллами.

Помимо кварца в различных пьезопреобразователях применяют кристаллы сульфата лития Li2SO4·H2О, сегнетовой соли, дигидрофосфата аммония, а также ниобат и танталат лития, которые превосходят кварц по добротности в диапазоне высоких частот и СВЧ. Для придания пьезоэлектрических свойств сегнетоэлектрические кристаллы LiNbO3 и LiTaO3 переводят в монодоменное состояние путём отжига в сильном электрическом поле при температуре несколько ниже точки Кюри.

Наиболее широкое применение в качестве пьезоэлектрического материала находит сегнетоэлектрическая *пьезокерамика.*

В обычном состоянии сегнетокерамика не проявляет пьезоактивности, поскольку является изотропной средой вследствие хаотического расположения отдельных кристаллических зёрен и деления их на домены с различным направлением спонтанной поляризованности. Однако, если подвергнуть сегнетокерамику воздействию сильного электрического поля, то поляризованность доменов получит преимущественную ориентацию в одном направлении. После снятия поля сохраняется устойчивая остаточная поляризованность, материал становится текстурованным.

По своим свойствам поляризованный сегнетокерамический образец близок к однодоменному кристаллу и обладает высокой пьезоактивностью.

Основным материалом для изготовления пьезокерамических элементов являются твёрдые растворы PbZrO3+PbTiO3 (цирконат-титанат свинца или сокращенно ЦТС). Эта керамика широко используется для создания мощных ультразвуковых излучателей в широком диапазоне частот для целей гидроакустики, дефектоскопии, механической обработки материалов.

Такие ультразвуковые генераторы применяются также в химической промышленности для ускорения различных процессов (эмульсификаторы, полимеризаторы, стерилизаторы и т. п.) и в полупроводниковой технологии для эффективной отмывки и обезжиривания полупроводниковых пластин с помощью ультразвуковой ванны.

Из пьезокерамики делают малогабаритные микрофоны, телефоны, громкоговорители (высокочастотные), детонаторы (для оружия), различные устройства поджига в газовых системах. Пьезокерамические элементы можно использовать в качестве датчиков давлений, деформаций, ускорений и вибраций. Двойное преобразование энергии (электрической в механическую и наоборот) положено в основу работы пьезорезонансных фильтров, линий задержки и пьезотрансформаторов.

Пьезотрансформаторы предназначены для получения высокого напряжения. Их обычно выполняют в виде пластины или бруска, одна половина которого (возбудитель колебаний) поляризуется по толщине, а другая половина (генератор) – по длине бруска (рисунок 5.3). Переменное электрическое поле, подводимое к зажимам возбудителя, вызывает резонансные механические колебания по длине бруска. В свою очередь, механические колебания, возникающие в генераторной части, приводят к появлению выходного электрического напряжения. Трансформаторы могут быть изготовлены для работы в на частоте 10–500 кГц. На более высоких частотах их размеры оказываются слишком малыми, а на низких – большими. Коэффициент трансформации напряжения, пропорциональный отношению *l / h*, может достигать значений 50 и более. Пьезокерамические трансформаторы используют в схемах питания электронно-лучевых трубок, газоразрядных приборов, счётчиков Гейгера и для генерирования высоковольтных импульсов. Преимуществами таких источников питания являются отсутствие магнитного поля, простота и надёжность конструкции, малая масса и габариты.

*l*

*U*вх

*h*

*U*вых

Рисунок 5.3 – Схема высоко­вольтного пьезоэлектрического трансформатора

Кроме керамики ЦТС для изготовления различных пьезоэлектрических преобразователей применяют керамические материалы на основе твёрдых растворов ВаNb2О6+PbNb2O6 и NaNbO3+KNbO3 Последние разработаны специально для высокочастотных преобразователей (10–40 МГц).

## 5.5 Пироэлектрики

К *пироэлектрикам* относят диэлектрики, обладающие сильной зависимостью спонтанной поляризованности от температуры.

Каждый участок пироэлектрика можно представить как конденсатор ёмкостью *C* (пропорциональной диэлектрической проницаемости ε), в котором при напряжении *U* запасена энергия *W*с = *CU*2/2. При нагреве ε и ёмкость *C* резко уменьшаются, а энергия не может измениться мгновенно, поэтому создаётся импульс напряжения.

Пироэлектрическими свойствами обладают некоторые линейные диэлектрики (например, турмалин, сульфат лития) и все сегнетоэлектрические материалы в монодоменизированном состоянии, для которого характерна одинаковая ориентация спонтанной поляризованности всех доменов. Значительный пироэффект в сегнетоэлектриках используется для создания тепловых датчиков и приёмников лучистой энергии, предназначенных, в частности, для регистрации инфракрасного и СВЧ-излучения.

Специфическим свойством пироэлектрических фотоприёмников является отсутствие избирательности по спектру излучения. Существенное преимущество их состоит в том, что они не требуют охлаждения при детектировании излучения даже в далёкой инфракрасной области спектра. Они обладают достаточно высоким быстродействием (способны работать в частотном интервале до 10 МГц), однако по чувствительности уступают полупроводниковым фотоприёмникам.

Максимальное проявление пироэлектрического эффекта наблюдают в сегнетоэлектриках с точкой Кюри, близкой к комнатной температуре. К их числу относятся кристаллы ниобата бария-стронция SrxBa1-xNb2O6 и триглицинсульфата. Повышенной чувствительностью на высоких частотах характеризуются кристаллы ниобата LiNbO3 и танталата LiTaO3 лития. Пиро- и пьезоэлектрические свойства обнаружены у некоторых полимеров, в частности, у поляризованных плёнок поливинилденфторида и поливинилденхлорида, отличающихся простотой технологии изготовления, невысокой стоимостью и малой инерционностью пироэффекта на высоких частотах.

## 5.6 Электреты

*Электретом* называют тело из диэлектрика, длительно сохраняющее поляризацию и создающее в окружающем его пространстве электрическое поле, т. е. электрет является формальным аналогом постоянного магнита, способным создавать электрическое поле в окружающем пространстве в течение многих месяцев и даже лет. К сожалению, время жизни электретов быстро уменьшается с повышением температуры и влажности окружающей среды. Термин электрет был предложен в 1896 г. английским физиком Хевисайдом, а первые образцы электретов были изготовлены японским исследователем Егучи из охлаждённого в сильном электрическом поле расплава полярных диэлектриков: пальмового воска и канифоли в 1922 г.

Большой интерес представляют *фотоэлектреты* из материалов, у которых под воздействием света появляется электропроводность (сера, сульфид кадмия и др.). Фотоэлектреты могут длительно сохранять заряды в темноте и быстро разряжаются при освещении.

Обычно электрет имеет вид тонкой пластинки или полимерной плёнки из полиэтилентерефталата, поликарбоната, полиметилметакрилата и др. В условиях повышенной влажности наиболее стабильны электреты из политетрафторэтилена.

Электреты могут быть использованы для изготовления микрофонов и телефонов, измерения механических вибраций, в качестве пылеуловителей, дозиметров радиации, измерителей атмосферного давления и влажности, электрометров, в клавишах вычислительных машин, в электрофотографии и во многих других случаях.

## 5.7 Материалы для твёрдотельных лазеров

*Лазер* представляет собой источник оптического когерентного излучения, характеризующегося высокой направленностью и большой плотностью энергии.

Рабочее тело лазера изготавливают, как правило, в виде цилиндрического стержня, торцевые поверхности которого обрабатываются с высокой степенью точности. Активной средой служит кристаллическая или стеклообразная матрица, в которой равномерно распределены активные ионы (активаторы люминесценции). Все процессы поглощения и излучения света связаны с переходами электронов между уровнями активного иона; при этом матрица играет пассивную роль. Тип активного иона в основном определяет спектр излучения лазера. Оптический резонатор выполняют в виде двух плоскопараллельных зеркал. Одно из них полупрозрачно для вывода излучения из активного элемента. Для возбуждения активных ионов используется оптическая накачка с помощью мощных газоразрядных ламп.

Одним из наиболее освоенных материалов лазерной техники является рубин. Именно на рубине в 1960 г. был создан первый твердотельный лазер. Рубинами называют кристаллы α-корунда (Аl2О3), в которых часть ионов алюминия замещена ионами хрома.

Искусственные кристаллы рубина обычно выращивают в печах по методу Вернейля, при котором тщательно размельченный порошок оксида алюминия с добавкой Cr2О3 медленно падает в пламя водородно-кислородной горелки. Отдельные частички порошка, проходя через пламя, расплавляются и затем кристаллизуются на затравочном кристалле, помещённом вне пламени. Полученную заготовку отжигают, а потом обрабатывают, придавая ей необходимые форму и размеры.

Высококачественные кристаллы рубина могут быть получены и методом вытягивания из расплава.

Важнейшим материалом лазерной техники является иттрий-алюминиевый гранат, в кристаллической решётке которого часть ионов иттрия замещена ионами неодима (сокращенная форма записи YAG: Nd3+). Низкая пороговая энергия возбуждения при комнатной температуре, высокая механическая прочность и хорошая теплопроводность дают возможность применять этот материал в лазерах, работающих в непрерывном и высокочастотном режимах.

Поскольку в спектре YAG: Nd3+ отсутствуют широкие полосы поглощения, то для увеличения эффективности оптической накачки обычно используют эффект *сенсибилизации.* В качестве сенсибилизатора вводят ионы Сr3+. Энергия накачки, поглощенная в широких полосах сенсибилизирующего иона Сr3+, резонансным безызлучательным путём передается активным ионам Nd3+. Сенсибилизация позволяет повысить коэффициент полезного действия до 5–7 % и довести мощность в непрерывном режиме генерации до сотен ватт.

По мощности излучения и значению коэффициента полезного действия лазеры YAG: Nd3+ + Cr3+ конкурируют с мощными лазерами на углекислом газе, отличаясь от последних значительно меньшими габаритами и более удобной для практического применения длиной волны излучения.

В настоящее время для твёрдотельных лазеров широко используют гадолиний-галлиевые гранаты (GGG), а также гадолиний-скандий-галлиевые (GSGG) и иттрий-скандий-галлиевые (YSGG). Активирование осуществляют неодимом (λ = 1,06 мкм) или европием (λ = 2,79 мкм). Находят применение также другие высокотемпературные соединения: алюминаты (например YAlO3), молибдаты (например NaLa(MoO4)2, вольфраматы (например шеелит CaWO4), флюорит CaF2, а также оксидные и фтор-бериллатные стёкла.

Лазеры находят применение в системах оптической локации, в телевидении, голографии, информационно-измерительной технике и в медицине. С их помощью осуществляется дальняя космическая связь. Широкое распространение получила лазерная обработка оптически непрозрачных материалов: импульсная сварка, плавление, пайка, отжиг, сверление отверстий, резание и др.

## 5.8 Жидкие кристаллы

*Жидкими кристаллами (ЖК)* называют вещества, молекулы которых обладают подвижностью при сохранении упорядоченной структуры. Для них характерна зависимость оптических свойств от внешних факторов (температуры, давления, электрического поля и др.). Эта зависимость открывает богатые возможности при изготовлении индикаторных устройств различного назначения.

Жидкие кристаллы были открыты в 1888 г. австрийским ботаником Ф. Рейнитцером. Однако широкое практическое применение эти вещества нашли cравнительно недавно. Специфика ЖК заключается в ограниченном температурном интервале существования мезофазы (т. е. жидкокристаллического состояния).

Жидкокристаллическое состояние образуют в основном органические соединения с удлинённой палочкообразной формой молекул. Значительную часть ЖК составляют соединения ароматического ряда, т. е. соединения, молекулы которых содержат бензольные кольца. По признаку общей симметрии все жидкие кристаллы подразделяются на три вида: смектические, нематические и холестерические.

*Смектическая* фаза отличается слоистым строением. Из-за высокой вязкости, смектические ЖК не нашли широкого применения.

В *нематической* фазе длинные оси молекул ориентированы вдоль одного общего направления, называемого нематическим директором. Для получения цветных изображений в ЖК вводят молекулы красителя, которые также имеют удлинённую палочкообразную форму. Область применения нематических жидких кристаллов – индикаторные устройства. К таким устройствам относятся дисплеи, крупноформатные табло, цифровые индикаторы для микрокомпьютеров, циферблаты электронных часов и цифровых измерительных приборов. Основными преимуществами таких индикаторов являются: хороший контраст при ярком освещении; низкая потребляемая мощность; совместимость с интегральными схемами по рабочим параметрам и конструктивному исполнению; сравнительная простота изготовления и низкая стоимость.

*Холестерическая* фаза на молекулярном уровне похожа на нематическую. Однако вся её структура дополнительно закручена вокруг оси винта, перпендикулярной молекулярным осям. Шаг винтовой спирали сильно зависит от внешних воздействий. При увеличении температуры спираль развивается, увеличивается расстояние между молекулярными слоями и, соответственно длина волны отражаемого света, который смещается в красную область. Изменение цвета жидкого кристалла при изменении температуры называют *термохромным* эффектом.

В результате получается цветовой термометр, который нашёл различные применения. С помощью жидкокристаллических индикаторов можно зарегистрировать изменения температуры в тысячные доли градуса. Цветовые термоиндикаторы с успехом применяются для целей технической и медицинской диагностики. Они позволяют очень просто получить цветовую картину теплового поля. Этот же принцип используется для визуализации инфракрасного излучения и полей СВЧ.

Следует отметить, что в жидких кристаллах для индикации используется окружающий свет, благодаря чему их потребляемая мощность значительно меньше, чем в других индикаторных устройствах, и составляет 10–4–10–6 Вт/см2. Это на несколько порядков ниже, чем в светодиодах, порошковых и плёночных электролюминофорах, а также в газоразрядных индикаторах. Недостатками устройств на жидких кристаллах являются невысокое быстродействие, а также подверженность процессам электро- и фотохимического старения.

**Контрольные вопросы**

1 Какие диэлектрики называют активными? В чём их отличие от пассивных?

2 В чём особенности структуры сегнетоэлектриков?

3 Как объяснить диэлектрический гистерезис и нелинейность сегнетоэлектриков?

4 Что называют сегнетоэлектрической точкой Кюри?

5 Назовите наиболее важные применения сегнетоэлектриков.

6 Что такое прямой и обратный пьезоэффект? Где и как можно применить эти явления?

7 Что такое пироэлектрический эффект? Где и как его применяют?

8 Что такое электреты и фотоэлектреты? Где их применяют?

9 Какие материалы используют в твёрдотельных лазерах?

10 Какие элементы используют в качестве активаторов и сенсибилизаторов лазерных материалов?

11 В чем различие между «жидким» и твёрдым кристаллом?

12 Как классифицируют и для чего применяют жидкие кристаллы?